

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**  
**LABORATUVAR DENEY FÖYÜ**

**KANTİTATİF METALOGRAFİ DENEYİ**

**Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI**

**Arş. Gör. Sedat A. TUNÇ**

**TRABZON**

**2022**

## RAPORDA İSTENİLENLER

- a. Rapor, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü internet sitesindeki '**Deney Raporu Yazım Kılavuzu**' esas alınarak, yazım ve noktalama kuralları gözetilerek özenle hazırlanmalı, A4 ebatlarında beyaz kağıda mavi tükenmez kalemle yazılmalıdır.
- b. Rapor; kapak, deneyin amacı, teorik bilgiler, deneysel çalışmalar, sonuçlar ve tartışma, ödev, kaynakça ve tasarım bölümlerini içermelidir.
- c. Sonuçlar bölümünde nokta sayma usulü ile deney esnasında incelenen yapıların temsili iç yapıları çizilip, yaklaşık karbon oranları hesaplanmalıdır.
- d. Deney raporu deney tarihinden itibaren 1 hafta içerisinde teslim edilmelidir. Teslimi 1 haftayı geçmiş raporlar kabul edilmeyecektir.
- e. **Raporun değerlendirilmesinde sayfa tertip ve düzeni, yazım ve noktalama kuralları, deneyin yapılışı, ödev ve tasarım bölümlerindeki işlemler ve raporun teslim edilme tarihi göz önünde bulundurulacaktır.**

## 1. Deneyin Amacı

Kantitatif metalografik yöntemlerin öğrenilmesi ve bu yöntemlerin metal ve alaşımlarının tane yapısı, tane boyutu ve faz oranlarının tespit edilmesinde kullanımının öğrenilmesi.

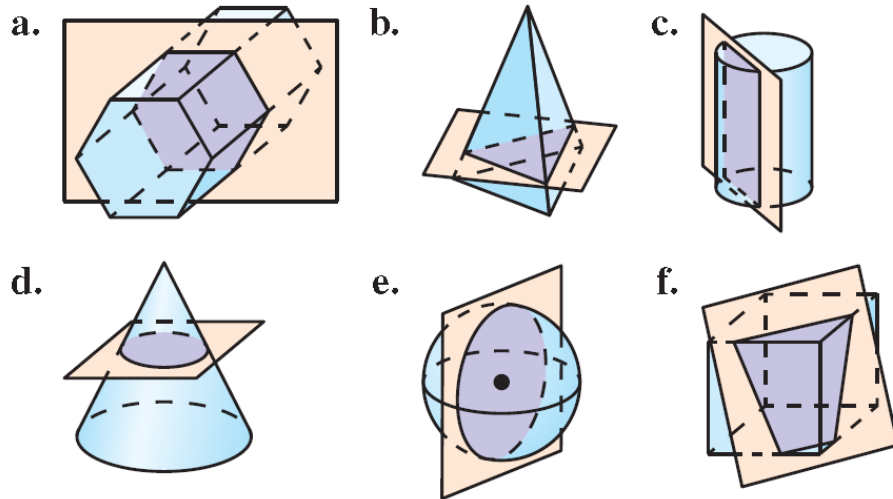
## 2. Teorik Bilgi

Metallerin tane büyüklüğü metal özelliklerine büyük ölçüde etki etmektedir. Kimyasal bileşimleri aynı olsa bile tane büyüklükleri farklı olan malzemelerin mukavemet, sertlik, uzama, çentik darbe mukavemeti gibi özellikleri farklılık göstermektedir. Bundan dolayı kullanılan malzemenin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

### 2.1. Stereoloji

Stereoloji, üç boyutlu bir yapının (metal, hücre, doku vb.) görüntülerinin iki boyuta indirgenip bu iki boyutlu görüntülerden yola çıkılarak üç boyutlu yapının özellikleri hakkında yorum yapılabilmesine olanak sağlayan bir bilim dalıdır.

Örneğin çeşitli boyutta ve şekildeki metalurjik numunelerin içyapısındaki fazlar, inklüzyonlar veya diğer süreksizliklerin tespitinde, karbürizasyon derinliğinin ya da kaplama kalınlığının belirlenmesinde numunelerden alınan kesitlerden faydalanılarak incelemelerde bulunmaktadır. 3 boyutlu bir numunenin herhangi bir kısmından alınacak olan bir kesit, kesit alma doğrultusundaki 3 boyutlu yapının izdüşümünü yani 2 boyutlu görüntüsünü elde etmemize olanak sağlar.



**Şekil 1.** Farklı geometriye sahip 3 boyutlu nesnelerin kesit düzlemlerinin oluşturduğu kesit görüntüleri.

Çeliklerdeki karbürizasyon derinliği, kaplama kalınlığı gibi ölçümlerin yapılmasında metalografik incelemelerde kesit alınmış yapının üzerine yerleştirilen bir ölçekle ölçümü gerçekleştirilebilmektedir (ASTM E1077). Benzer şekilde yapının kesit görüntüsü üzerinden genel yapı hakkında ASTM standartlarında ortalama tane boyutu, faz oranları gibi değerlendirmeler de yapılabilmektedir (ASTM E562).

## 2.2. Tane Büyüklüğünün Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Metalik malzemeleri oluşturan tanelerin boyutları, bu malzemelerin birçok özelliği üzerinde etkilidir. Mukavemet, sertlik gibi önemli özellikler metal alaşımlarda tane boyutu ile doğrudan ilgili özelliklerdir. Çeliklerde en önemli mukavemet artırma mekanizmalarından bir tanesi de tane boyutunun küçültülmesidir. Küçülen taneler sayesinde içyapıda daha fazla tane sınırı oluşmakta ve böylece dislokasyon hareketi engellenmiş olacaktır.

Çeliklerde tane çapı (d) ile akma mukavemeti arasındaki bağıntı Hall-Petch eşitliği ile verilmektedir;

$$R_e = s_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

Burada;  $R_e$ : Akma mukavemeti,  $s_0$ , k: malzemeye bağlı sabitler, d: ortalama tane çapı'dır.

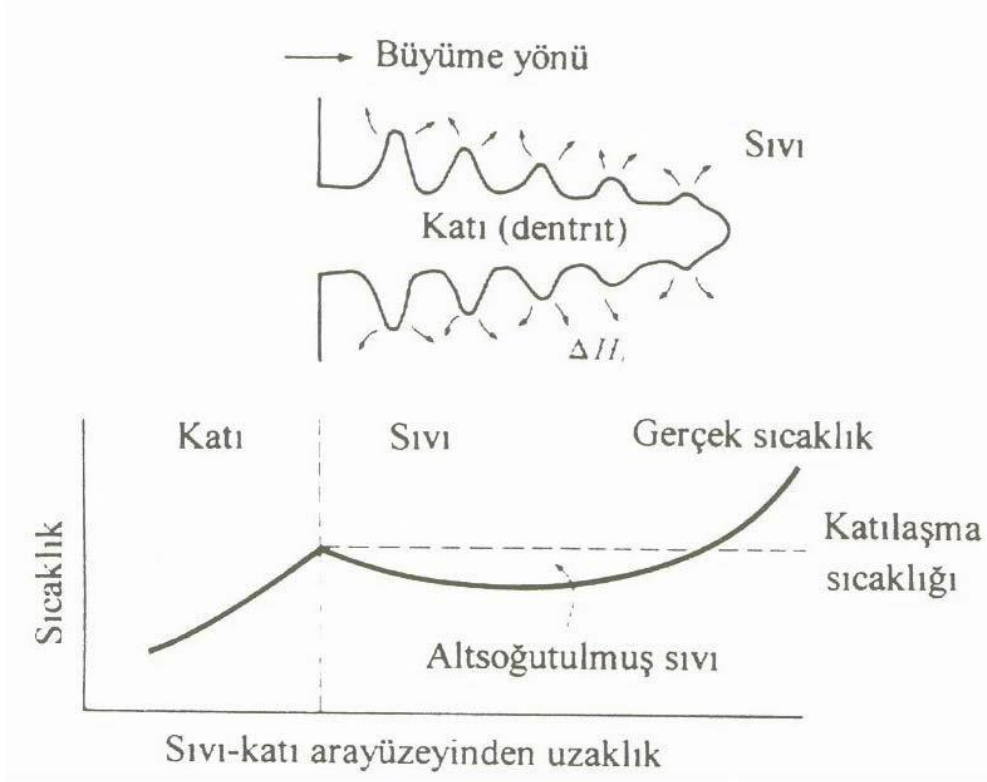
### Tane büyüklüğünün malzeme özellikleri üzerindeki en önemli etkileri şunlardır;

- Tane boyutunun küçülmesiyle akma ve çekme mukavemeti belirli ölçüde artmaktadır.
- Tane boyutu küçüldükçe sünek-gevrek geçiş sıcaklığı düşüş gösterir ve oda sıcaklığındaki çentik darbe sünekliliği artar.,
- İri taneli yapıya sahip olan çeliklerin su verme ile daha derinlemesine sertleşmektedir ancak distorsiyona uğraması ve çatlaması daha kolay gerçekleşmektedir.
- Tane boyutunun küçülmesi çeliklerde yorulma mukavemetini artırır.
- Metal sacların derin çekilmesi, haddelenmesi vb. şekillendirme işlemleriyle şekillendirilmesinde iri taneli malzemelerin yüzeylerinde portakal kabuğu görüntüsü oluşmaktadır, ince taneli malzemelerde ise daha düzgün bir yüzey elde edilir.
- İri taneli çeliklerin kaba talaşlı imalat özellikleri iyiyken, ince taneli çeliklerin son talaşlı imalat(bitirme) özellikleri daha iyidir.,
- Çeliklerde tane boyutu büyüdükçe sürünme dayanımları da artış göstermektedir.

## 2.3. Tane Büyümesi ve Büyüklüğünün Kontrolü

Metal veya metal alaşımlarında, tane büyüklüğü öncelikle katılaşma şartlarına bağlıdır. Sıvı metal kokil kalıba ya da kum kalıba döküldüğünde, katılaşma öncelikle kalıp cidarında başlar ve bir katı çekirdek oluşur. Sıvı metal içerisinde belirli bir kristal kafese sahip bu atom topluluğuna (en küçük katı metal parçacığı) '**çekirdek**' adı verilir.

Çekirdeklenme zayıf olduğunda sıvı metal katılaşma sıcaklığının biraz altındaki bir sıcaklığa soğur. Bundan dolayı sıvı metal içerisinde birbirinden farklı gizli ısılara sahip sıvı metal gölcükleri oluşur bu sıvı metal gölcükleri sıvı metalin ısısını absorbe ederler ve dendrit taneleri büyümeye devam ederken sıvı metal gölcükleri çok daha geç katılaşır. Böylece dentritik büyüme meydana gelir. Dendritler birbirleriyle temas edene dek büyür ve birbirleriyle temas ettikleri bölgelerde tane sınırlarını oluştururlar.



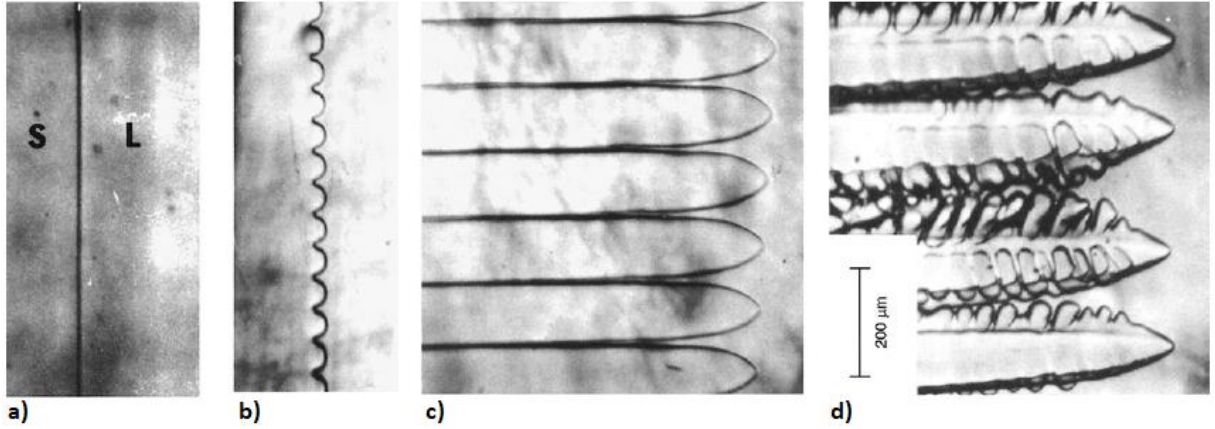
**Şekil 2.** Dendritik büyüme mekanizması.

Dendritik büyümeden farklı olarak düzlemsel büyümede ise sıvı metalin ısısı kalıp tarafından katılaşmış taneler tarafından düzlemsel bir şekilde arayüzey vasıtası ile absorbe edilir ve düzlemsel büyüme gerçekleşir.



**Şekil 3.** Düzlemsel büyüme mekanizması.

Sıvı metal sıcaklığı, katılaşma sıcaklığının üzerinde olduğunda katı-sıvı arayüzeyindeki şişkinlik tekrar ergir ve böylece katılaşma sırasında düzlemsel arayüzeyin korunmasına neden olur. Ergime ısı katıya doğru bu düzlemsel arayüzey vasıtasıyla uzaklaştırılır.



**Şekil 4.** Sıvı metalin katılaşması esnasındaki tane büyüme mekanizmaları; a) Düzlemsel büyüme, b-c) Hüresel büyüme, d) Dendritik büyüme.

Katılaşma tamamlandığında kristal kafes doğrultusu aynı ve tek olan her metal parçasına ‘tane’ denir. Dökümlerde tane büyüklüğü çekirdeklenme ve büyüme hızına bağlıdır. Eğer oluşan çekirdek sayısı fazla ise malzeme ince taneli bir yapıya sahip olacaktır. Sıvı metalin soğuma hızı (özellikle homojen çekirdeklenmede) çekirdeklenme hızına ve dolayısıyla tane büyüklüğüne etki eden en önemli etkidir. Hızlı soğumada (kokil kalıba döküm) çok sayıda çekirdek oluşur ve malzeme ince taneli olur. Yavaş soğumada ise (kum kalıba döküm) oluşan çekirdek sayısı daha azdır ve bunlar büyüyerek iri taneli bir yapı meydana getirir.

Dökümlerde çekirdeklenme hızını arttıran ve ince tane oluşturmayı sağlayan diğer faktörler ise şunlardır;

- Sıvı metale çekirdeklenmeyi başlatacak (heterojen çekirdeklenmeyi sağlayacak) maddeler ilave etmek. Bu türden maddelerin ilave edilmesine ‘aşılama’ adı verilir.
- Sıvı metal veya alaşım katılaşırken ultrasonik titreşimler uygulamak, elektromanyetik karıştırma yapmak, likidüs-solidüs sıcaklığı arasında mekanik karıştırma yapmak gibi fiziksel etkiler uygulamak suretiyle kristaller kırılabilir ve fazla büyümeleri engellenebilir.

Metallerin tane büyüklüğünü döküm işleminden sonra da değiştirmek mümkündür. Örneğin; belirli bir oranda soğuk deformasyon uygulandıktan sonra yeniden kristalleşme tavi ile tane yapısı yeniden oluşur. Ancak kritik deformasyon oranında çok iri taneler elde edilirken, artan deformasyon oranı ile elde edilen tane yapısı incelik.

Yüksek sıcaklıkta (ötektoid altı çeliklerde 900-1000°C) tavlama ve nispeten daha düşük sıcaklıklarda daha uzun süre tutma ve kaynak sırasında ısı etkisi altında kalan bölgelerde tane irileşmesi meydana gelir. Çeliklerde allotropik rekristalizasyon olduğundan normalizasyon işlemi ile taneler yeniden küçültülebilir. Fakat demir esaslı olmayan metallerde deformasyon olmaksızın tane küçültmek mümkün değildir. Alaşım elementi bulunması ve ayrıca yüksek sıcaklıkta çözünmeyen nitrür ve karbürlerin bulunması ısı

işlem sırasında tane büyümesini önleyici etkiye sahiptir. Yüksek saflıktaki metallerin yapısındaki taneler irileşmeye çok daha fazla eğilimlidir.

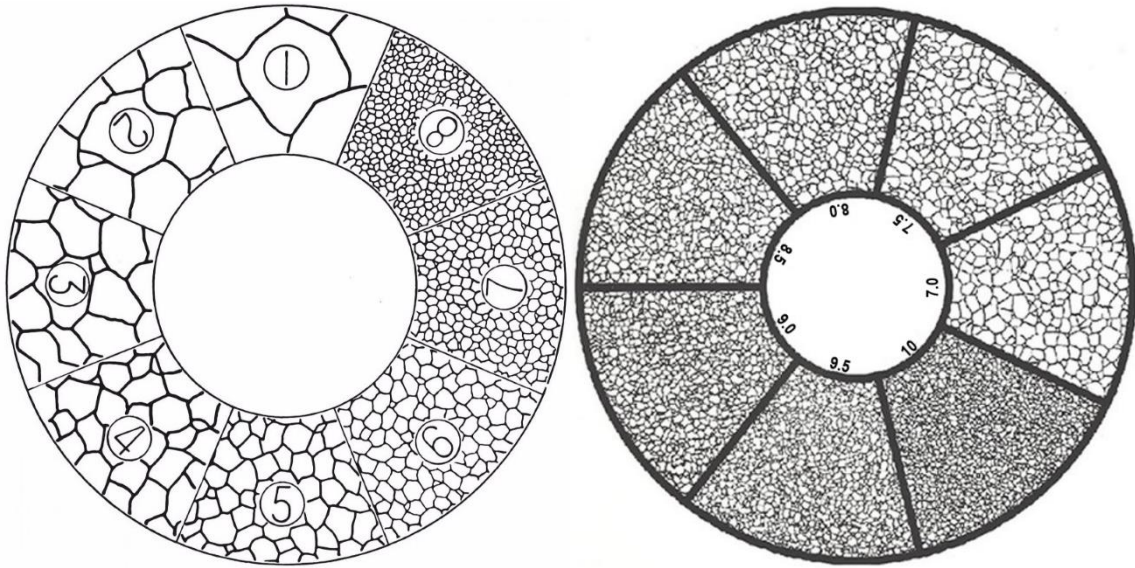
## 2.4. Tane Büyüklüğünün Ölçülmesi

Tane büyüklüğünün ölçülmesinde üç ayrı yöntem kullanılır,

**a.** Karşılaştırma usulü, **b.** Kesitirme veya Heyn usulü, **c.** Planimetrik veya Jeffries usulü

### 2.4.1. Karşılaştırma Usulü

Numune uygun şekilde parlatılıp dağlandıktan sonra metal mikroskopunda 100 büyütmede (100X) incelenir ve fotoğrafı çekilir. Bu durumda görülen tane büyüklüğü ASTM standart tane büyüklüğü kartları ile (ASTM E112-13) karşılaştırılır. Bu karşılaştırmada incelenen tane büyüklüğünün hangi tane büyüklüğüne karşılık geldiği bulunur.



Şekil 5. ASTM Standart tane büyüklüğü kartları.

Eğer metal karışık tane boyutuna sahipse tane boyutu iki sayı ile verilir. Bu yöntem eş eksenli ve tamamen rekristalize olmuş tek fazlı yapıdaki taneler için en uygun ve yeteri kadar doğru sonuç veren bir yöntemdir. Her numunenin en az üç ayrı bölgesine karşılaştırma yapılmalıdır.

Kesit çok taneli yapıda belirli bir hacim işgal eden tanelerin yalnız bir doğrultudaki düzlem kesitini gösterdiğinden, kesitte görülen tane sınırları tane büyüklüğü hakkında tam bir fikir vermez. Örneğin tanelerin küresel olduğu düşünülürse herhangi bir kesit her tanenin ortasından geçmez. Ancak tane büyüklüğünün hacimsel olarak ölçülebilmesinin zorluğu karşısında kesitten ölçülen ortalama tane boyutu ile yetinilir. Bu durum her üç usul için geçerlidir.

Karşılaştırma usulünde ASTM tane büyüklüğü numarası aşağıdaki formül kullanılarak bulunur.

$$n = 2^{G-1}$$

Burada; n: 100X büyütmede inç<sup>2</sup>'deki tane sayısı, G: ASTM tane büyüklüğü numarasıdır.

ASTM tane büyüklüğü numarasına göre 100X büyütmede inç<sup>2</sup>'deki tane sayısı Tablo 1' de verilmiştir. ASTM (American Society for Testing Materials) tane büyüklüğü numarası 14'e kadar çıksa da en çok görülen durum 1-8 arasındadır. ASTM numarası arttıkça tane boyutu küçülmektedir. Çeliklerde ASTM numarası < 5 olursa iri taneli, ASTM numarası > 5 olursa ince taneli çelik olarak kabul edilir.

Mikroskopla tane büyüklüğü ölçmek için özel oküler de kullanılmaktadır. Burada tane büyüklükleri okülerin içine çizilmiş olup daha çabuk ve kolay değerlendirme yapılabilmektedir.

Mikroskopta farklı büyütme oranlarında inceleme yapılırsa, mesela 50X'de tane iriliği tablosundaki tane iriliğinin iki altı, 200X'de iki üstü, 400X'te ise dört üstü olan tane numarası alınır.

Tablo 1. Tane büyüklüğü numarasına göre tane sayısı.

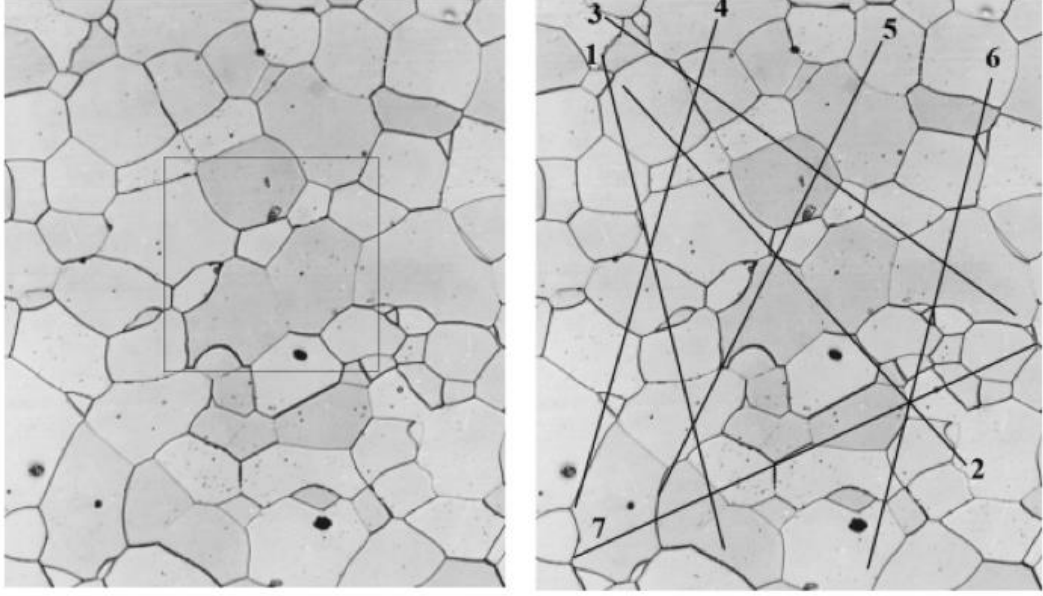
ASTM tane büyüklüğü No.[G]	100X büyütmede inç <sup>2</sup> başına tane sayısı Ortalama [n]	Alt ve üst sınırlar	Ortalama tane çapı [mm]
-3	0,06		1
-2	0,12		0,75
-1	0,25		0,5
0	0,5		0,35
1	1		0,25
2	2	1,5-3,0	0,18
3	4	3-6,0	0,125
4	8	6-12	0,091
5	16	12-24	0,062
6	32	24-48	0,044
7	64	48-96	0,032
8	128	96-192	0,022
9	256	192-384	0,016
10	512	384-768	0,011
11	1024	768-1536	0,008
12	2048	1536-3072	0,006

#### 2.4.2. Doğrusal Kesiştirme veya Heyn Usulü

Bu usulle tane büyüklüğü ölçmek mikroskoptaki görüntü buzlu cam üzerine düşürülür veya fotoğrafı çekilir. Buzlu cam veya fotoğraf üzerine belirli sayıda çizgiler çizilip çizgilerin kestiği taneler sayılır. Çizgilerin uçlarındaki taneler yarım sayılır. Tatminkar bir ortalama için birbirine dik üç temel düzlemde ölçüm yapılmalıdır. Her düzlemde ölçülen çizgi boyu (mm olarak) ortalama kesilen tane sayısı ile büyütme miktarının çarpımına bölünerek ortalama kesişme uzunluğu (ya da tane çapı) bulunmuş olur. Eş eksenli olmayan tanelerin büyüklüğünün ölçülmesinde bu usul tavsiye edilir.

Örneğin haddelenmiş durumdaki bir malzemenin tane büyüklüğünü ölçmek için haddeleme düzleminde, buna dik düzlemde ve yan yüzeyde tane büyüklüğü ölçülerek her üç düzlemdeki değerler bulunur.





**Şekil 6.** Doğrusal kesiştirme veya Heyn usulünün uygulanması.

Bu yöntem ile tane boyutu hesaplanırken görüntü üzerine her biri 60 mm uzunluğunda farklı doğrultularda en az 7 tane lineer çizgiler çekilir ve bu doğruların ayrı ayrı kaç adet tane kestiği sayılarak toplanır. Daha sonra ortalama tane boyutunu bulmak için ilgili formülde tüm veriler yerine yazılarak işlem yapılır. Heyn usulü ile tane boyutunun hesaplanmasında aşağıdaki formülden faydalanılır;

$$d = \frac{L_T}{PM}$$

Burada; d: ortalama tane boyutu (mm),  $L_T$ : çizgilerin toplam uzunluğu, P: Toplam kesişim sayısı, M: Büyütme.

Elde edilen ortalama tane büyüklüğünden ASTM tane boyutunu hesaplamak için ise aşağıdaki denklemden faydalanılır;

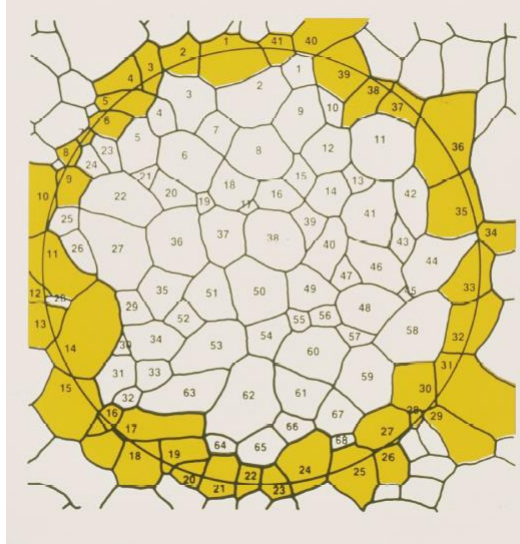
$$G = -6,6457 \log d - 3,298$$

Burada; G: ASTM tane büyüklüğü numarası.

Denklemden elde edilen sayısal veri en yakın tamsayı değerine yuvarlanarak ASTM Tane Büyüklüğü Numarası elde edilmiş olur.

#### **2.4.3. Planimetrik veya Jeffries Usulü**

Bu usulde fotoğraf veya buzlu cam üzerine alanı 5000 mm<sup>2</sup> olan daire (çapı 79.8 mm) veya dikdörtgen çizilir. Büyütme bu alanda en az elli tane olacak şekilde ayarlanır. Alandaki bütün tanelerle ( $n_1$ ) çevresinin kestiği tanelerin yarısı ( $n_2/2$ ) sayılarak toplam tane sayısı veya alandaki eşdeğer tam tane sayısı ( $n=n_1+n_2/2$ ) bulunur. Buradan mm<sup>2</sup>'deki tane sayısı ( $N_A$ ) hesaplanır.



Şekil 7. Jeffries usulüne göre mikroyapı üzerine çizilmiş 79.8 mm çaplı daire.

$$N_A = f (n_1 + n_2/2)$$

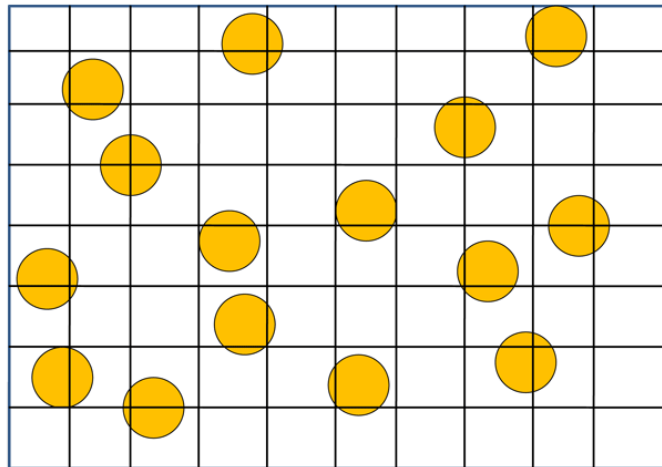
Burada; f: lineer büyütmenin karesinin 5000'e bölünmesi ile elde edilmiş Jeffries çarpanı. Bulunan  $N_A$  değeri kullanılarak ASTM tane büyüklüğü numarası G aşağıdaki bağıntıdan bulunur;

$$G = [3,22(\log N_A)] - 2,95$$

Bu usul, eş eksenli taneler için karşılaştırma usulünden daha üstündür. Ancak zor ve zaman alıcı bir usul olduğundan daha çok araştırma çalışmalarında kullanılır.

#### 2.4.4. Nokta Sayma Usulü

Faz alanlarının oranlarını hesaplayabilen bilgisayar destekli mikroskoplar (quantimet) günümüzde bilimsel çalışmalarda ve metalografik incelemelerde kullanılmaktadır. Ancak bu imkan yoksa yaklaşık sonuç veren 'nokta sayma yöntemi' de kullanılabilir. Bunu uygulamak için karelerden oluşan bir ağ (ızgara) sistemi kullanılır (Şekil 8).



Şekil 8. Örnek ölçüm ağı (ızgarası).

Bu yöntemle asetat üzerine çizilmiş olan ağ, mikrofotograf üzerine rastgele yerleştirilir. Kaç tane kesişme noktasının oranı bulunmak istenen fazın içerisine ve kaç tane kesişim noktasının oranı bulunmak istenen fazın sınırına denk geldiği sayılır. Faz içerisine düşen noktalar '1' olarak, faz sınırına düşen noktalar ise '1/2' olarak sayılır. Bulunan sonuç ağdaki toplam nokta sayısına bölünerek faz alan oranı tespit edilir. Ölçme mikrofotograf üzerindeki farklı alanlarda ne kadar fazla tekrarlanırsa elde edilen sonucun doğruluğu o denli gerçeğe yaklaşır. İncelenen fazın oranı azaldıkça kullanılan ızgaradaki noktaların toplam sayısı artırılır. Bunun için (3/n) oranı kullanılır. Örneğin incelenen fazın orası yapı içerisinde 0.18 ise ağdaki toplam nokta sayısı (3/0.18 = 16) alınır. Alan oranı yaklaşık olarak hacim oranına ( $A_v=V_v$ ) eşittir.

#### 2.4.4.1. Alaşımız Karbon Çeliklerinde Mikroskobik Faz Oranlarından Yaklaşık Karbon Oranının Bulunması

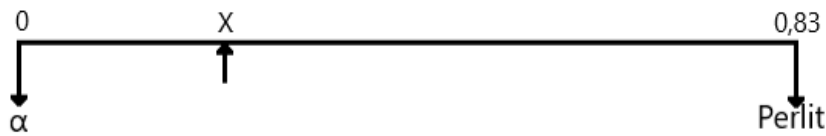
Alaşımız karbon çelikleri östenit bölgesinden yavaş soğutulmuş (tavlanmış) durumdayken metalografik yapıda görülen faz oranlarından (örneğin ferrit ve perlit fazlarının mikroskobik görüntüde kapladıkları alanların oranlarından) yaklaşık karbon oranı bulunabilir. Bunun için kaldıraç kuralından yararlanır.

##### Örnek Problem:

- Metal mikroskobunda %67 ferrit, %33 perlit içeren alaşımız ötektoid altı karbon çeliğinin,
- %6 ötektoid dışı sementit içerdiği belirlenen ötektoid üstü alaşımız karbon çeliğinin yaklaşık karbon oranını hesaplayınız.

##### Çözüm;

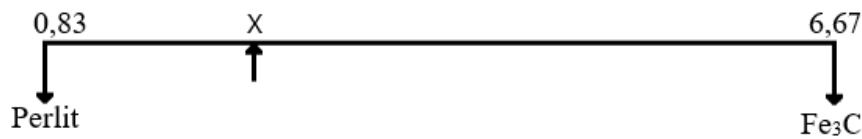
- Oda sıcaklığında ferrit fazında çözünen karbon oranını 0 kabul edip bilinmeyen karbon oranını X ile göstererek kaldıraç kuralını uyguladığımızda;



$$\% \text{ perlit} = ((X-0) / (0,83-0)) * 100 = 33 \text{ denkleminde,}$$

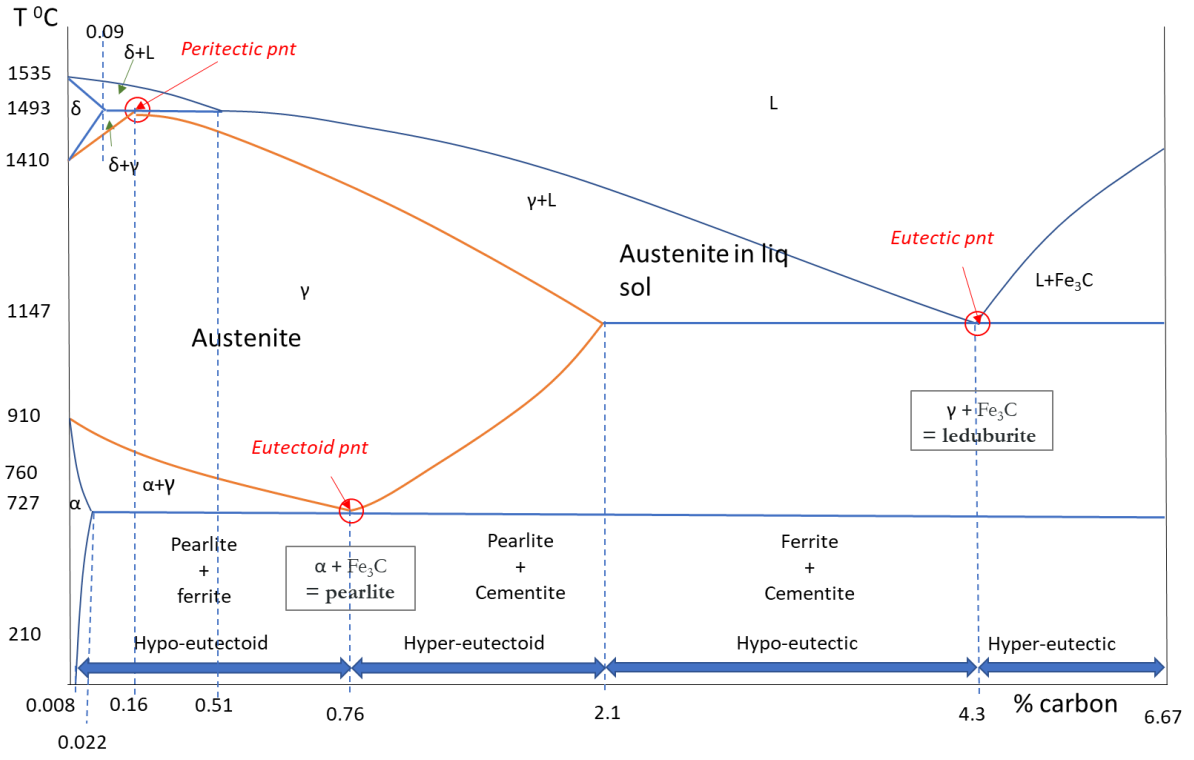
X = % 0,40 bulunur. Bu durumda bu çelik yaklaşık % 0,40 C içeriğine sahiptir.

- Ötektoid üstü bileşimdeki çelikte bilinmeyen karbon oranı yine X ile gösterilirse;

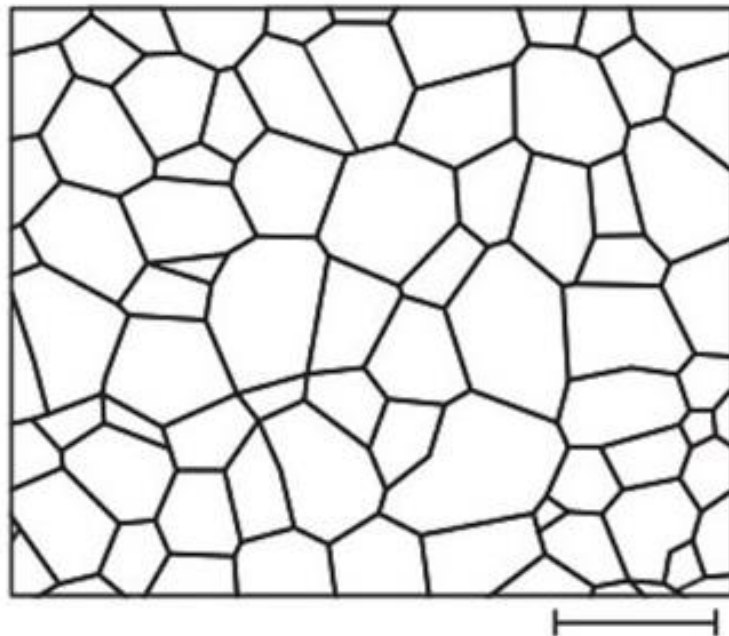


$$\% \text{ Fe}_3\text{C} = ((X - 0,83) / (6,7- 0,83)) * 100 = 6$$

X = 1,2 bulunur. Bu çelik yaklaşık % 1,2 C içermektedir.



Şekil 9. Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramı.



### 3. KAYNAKLAR

- [1] Shumann, H., ‘‘Metallographie’’, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig, 1967.
- [2] Mehl, F.R., ‘‘The Principles of Metallographic Laboratory Practice’’, McGraw-Hill, 1943.
- [3] Guy, A.G., ‘‘Essentials of Material Science’’, McGrawHill, 1976.
- [4] Pascoe, K.J., ‘‘An Introduction to the Properties of Engineering Materials’’, Van Nostrand R. Comp., London, 1972.
- [5] ASM Metals Handbook, Vol. 18, 8<sup>th</sup> Edition, Metals Park, Ohio, 1980.
- [6] G. Vander, ‘‘USING MICROSTRUCTURAL ANALYSIS TO SOLVE PRACTICAL PROBLEMS Introduction to Quantitative Metallography.’’
- [7] P. C. Ibáñez, ‘‘GRAIN SIZE ASTM E 112.’’
- [8] D. M. Stefanescu and R. Ruxanda, ‘‘The Liquid State and Principles of Solidification of Cast Iron,’’ Accessed: Sep. 23, 2022. [Online]. Available: [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org).
- [9] B. Z. Altunkaynak, M. E. Önger, M. E. Altunkaynak, E. Ayranci, and S. Canan, ‘‘A brief introduction to stereology and sampling strategies: Basic concepts of stereology,’’ *NeuroQuantology*, vol. 10, no. 1, pp. 31–43, 2012, doi: 10.14704/NQ.2012.10.1.427.
- [10] G. F. Vander Voort, ‘‘GRAIN SIZE MEASUREMENT.,’’ *ASTM Spec. Tech. Publ.*, pp. 85–131, 1984, doi: 10.1520/STP30216S.
- [11] [astm.org](http://astm.org)

## TASARIM

- a. Aşağıda boş bırakılan alanı kendi istediğiniz bir morfolojiye sahip taneleri çizerek doldurunuz.
- b. Karşılaştırma usulünde verilen denklemden yararlanarak tasarladığınız içyapıya ait ASTM Tane Büyüklüğü Numarasını (G) hesaplayıp föyünüzdeki tablo yardımıyla tespit ediniz.

(Gerekli işlemler ve çizimler, aşağıdaki kutucuğa yapıp, föyün bu sayfası deney raporuna eklenecektir.)

